

2/1/02
K. Halsey

Attorney Docket No. 826.1785

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Patent Application of:

Megumi NAGATA, et al.

Application No.:

Group Art Unit:

Filed: January 22, 2002

Examiner:

For: PROGRAM AND METHOD CALCULATING RESISTANCE OF A CONDUCTOR IN
CONSIDERATION OF A SKIN EFFECT

**SUBMISSION OF CERTIFIED COPY OF PRIOR FOREIGN
APPLICATION IN ACCORDANCE
WITH THE REQUIREMENTS OF 37 C.F.R. § 1.55**

Assistant Commissioner for Patents
Washington, D.C. 20231

Sir:

In accordance with the provisions of 37 C.F.R. § 1.55, the applicant(s) submit(s) herewith
a certified copy of the following foreign application:

Japanese Patent Application No. 2001-330770

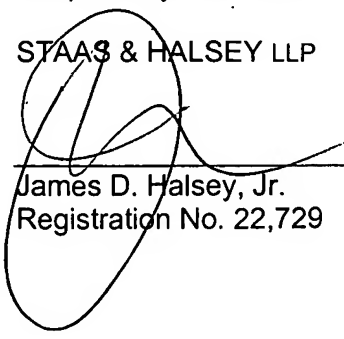
Filed: October 29, 2001

It is respectfully requested that the applicant(s) be given the benefit of the foreign filing
date(s) as evidenced by the certified papers attached hereto, in accordance with the
requirements of 35 U.S.C. § 119.

Respectfully submitted,

STAAS & HALSEY LLP

Date: January 22, 2002

By: 
James D. Halsey, Jr.
Registration No. 22,729

700 11th Street, N.W., Ste. 500
Washington, D.C. 20001
(202) 434-1500



JAPAN PATENT OFFICE



This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

Date of Application: October 29, 2001

Application Number: Patent Application
 No. 2001-330770

Applicant(s): FUJITSU LIMITED

December 14, 2001

Commissioner,
Japan Patent Office Kozo OIKAWA

Certificate No. 2001-3109341

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

J1017 U.S. PTO

10/052511



01/23/02

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2001年10月29日

出 願 番 号

Application Number:

特願2001-330770

出 願 人

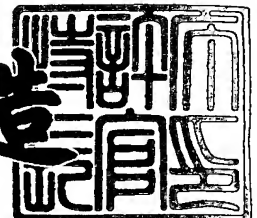
Applicant(s):

富士通株式会社

2001年12月14日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2001-3109341

【書類名】 特許願

【整理番号】 0152439

【提出日】 平成13年10月29日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 17/50

【発明の名称】 表皮効果を考慮した導体抵抗を計算するプログラムおよび方法

【請求項の数】 5

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

【氏名】 永田 恵

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

【氏名】 登坂 正喜

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

【氏名】 徳田 和彦

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

【氏名】 折原 広幸

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

【氏名】 川田 彦之

【特許出願人】

【識別番号】 000005223

【氏名又は名称】 富士通株式会社

【代理人】

【識別番号】 100074099

【住所又は居所】 東京都千代田区二番町 8 番地 2 0 二番町ビル 3 F

【弁理士】

【氏名又は名称】 大菅 義之

【電話番号】 03-3238-0031

【選任した代理人】

【識別番号】 100067987

【住所又は居所】 神奈川県横浜市鶴見区北寺尾 7 - 2 5 - 2 8 - 5 0 3

【弁理士】

【氏名又は名称】 久木元 彰

【電話番号】 045-573-3683

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 012542

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9705047

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 表皮効果を考慮した導体抵抗を計算するプログラムおよび方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムであって、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算し、計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項 2】 前記生成されたモデルを用いて、前記導体の表皮抵抗係数を計算し、得られた表皮抵抗係数を出力する処理を、さらに前記コンピュータに実行させることを特徴とする請求項 1 記載のプログラム。

【請求項 3】 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムであって、

前記周波数を用いて表皮の深さを計算し、

導体の表面からの深さを前記表皮の深さと分割レートの積で表したとき、該表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるような、複数の分割レートを用いて設定された、信号導体の表面と平行な複数の面により、該信号導体を縦横に分割し、該複数の分割レートを用いて設定された、グラウンド導体の表面と平行な複数の面により、該グラウンド導体を縦に分割し、さらに、該信号導体と該グラウンド導体の距離に基づいて設定された複数の面により、該グラウンド導体を横に分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記信号導体の抵抗を計算し、

計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

【請求項4】 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムを記録した記録媒体であって、該プログラムは、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算し、
計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【請求項5】 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求める計算方法であって、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように、該表面と平行な複数の面を設定し、

前記複数の面により前記導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算することを特徴とする計算方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、電子回路のプリント基板上に信号を配線する際の伝送波形シミュレーションに係り、表皮効果を考慮した導体抵抗を計算するプログラムおよび方法に関する。

【0002】

【従来の技術および発明が解決しようとする課題】

情報機器の高周波化に伴って、その周辺機器であるプリント基板においても動作周波数の高周波化が進んでいる。信号の周波数が高くなるにつれて、表皮効果の影響は無視できなくなり、その影響を考慮した解析が必要となる。表皮効果とは、導体の中心部に向かって抵抗が大きくなり、電流が導体の表面付近でしか流

れなくなる現象をいう。

【0003】

従来の解析ツールでは、表皮効果を考慮した導体抵抗を計算する際に、導体が複数の部分に分割される。しかし、抵抗を精度良く求めようとすると、導体を細かく分割する必要がある、計算に非常に多くの時間を要する。この方法では、導体内部の電流が流れていない部分まで細かく分割するために、本来なら計算しなくてもいい部分についても計算していることになり、無駄な計算時間がかかっている。

【0004】

本発明の課題は、表皮効果を考慮したシミュレーションにおいて、導体抵抗の計算に必要な精度を保ちつつ、その計算を高速化するプログラムおよび方法を提供することである。

【0005】

【課題を解決するための手段】

本発明のプログラムは、与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムである。

【0006】

このプログラムは、導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、表面と平行な複数の面により、導体を分割したモデルを生成し、生成されたモデルを用いて、与えられた周波数に対応する導体の抵抗を計算し、計算結果を出力する処理を、コンピュータに実行させる。

【0007】

表皮効果により導体には電流の流れる部分と流れない部分ができるが、一般に、電流は導体表面に沿って流れる傾向が見られる。そこで、導体を表面に平行に、かつ、表面に近い部分ほど小さな間隔で分割し、表面から遠い部分ほど大きな間隔で分割することで、電流の流れる部分をより詳細に計算するとともに、電流の流れない部分の計算を簡略化することができる。したがって、周波数に応じた導体抵抗の計算に必要な精度を保ちつつ、その計算を高速化することが可能にな

る。

【0008】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照しながら、本発明の実施の形態を詳細に説明する。

図1は、本実施形態のプログラムを用いて伝送波形シミュレーションを行うシミュレーション装置の構成図である。図1のシミュレーション装置は、入力部11、記憶部12、表示部13、制御部14、表皮抵抗係数算出部15、および解析部16を備え、これらの間ではバス17を介して必要なデータが転送される。制御部14、表皮抵抗係数算出部15、および解析部16はプログラムに対応する。

【0009】

シミュレーションに必要なパラメータは、入力部11から入力され、記憶部12に格納される。表皮抵抗係数算出部15は、格納されたパラメータを用いて、解析周波数に応じた導体の抵抗および表皮抵抗係数を計算し、解析部16は、計算された値を用いて、表皮効果を考慮したシミュレーションを行う。表皮抵抗係数算出部15による計算結果と解析部16によるシミュレーション結果は、表示部13から出力される。制御部14は、シミュレーション装置全体の制御を行う。

【0010】

一般に、導体の抵抗は周波数に依存して変化するが、表皮抵抗係数が分かれば、導体の抵抗を周波数の関数として表すことができるので、任意の周波数に対するシミュレーションを容易に行うことができる。

【0011】

図2は、表皮抵抗係数算出部15による計算処理のフローチャートである。この処理では、解析対象となる導体が複数のセグメントに分割され、各セグメントがさらに複数の部分に分割されて、数値積分により導体の抵抗および表皮抵抗係数が計算される。このとき、以下の文献に記載されたアルゴリズムに基づいた計算が行われる。

【0012】

W. T. Weeks et al., "Resistive and Inductive Skin Effect in Rectangular Conductors," IBM J. RES.DEVELOP. Vol. 23 No. 6, pp.652-660, November 1979

まず、ユーザは、配線設計に基づくパラメータを入力ファイルに書き込んで、シミュレーション装置に入力する（ステップS1）。ここでは、ユーザは、解析対象となる導体の形状をチェックし、伝送線路のパターンをチェックし、導体の数をチェックして、導体の断面形状に関するパラメータを入力する。解析対象となる導体には、信号導体およびグラウンド（GND）導体が含まれる。

【0013】

図3、4、5、および6は、導体の断面形状のモデルを示している。図3は、信号導体21およびGND導体22からなる単導体のマイクロストリップラインの断面形状を示しており、図4は、信号導体31、32およびGND導体33からなる2導体のマイクロストリップラインの断面形状を示している。

【0014】

また、図5は、信号導体42およびGND導体41、43からなる単導体のストリップラインの断面形状を示しており、図6は、信号導体52、53およびGND導体51、54からなる2導体のストリップラインの断面形状を示している。これらの図から分かるように、信号導体の断面形状としては、長方形および台形を含む任意の四辺形を扱うことが可能である。断面形状のパラメータとしては、以下のようなものが入力される。

- (1) マイクロストリップラインまたはストリップラインを指定するパラメータ
- (2) N：信号導体の数（単導体の場合は $N=1$ 、2導体の場合は $N=2$ ）
- (3) H：ストリップラインにおける絶縁層の高さ
- (4) h-e d：第1のGND導体の表面を基準とする第1の信号導体の下底の高さ
- (5) w1-e d：第1の信号導体の下底の幅
- (6) w2-e d：第1の信号導体の上底の幅

- (7) $t - e d$: 第1の信号導体の厚さ
- (8) $g w 1$: 第1のGND導体の幅
- (9) $g t 1$: 第1のGND導体の厚さ
- (10) $g w 2$: 第2のGND導体の幅
- (11) $g t 2$: 第2のGND導体の厚さ
- (12) $h - i n g$: 第1のGND導体の表面を基準とする第2の信号導体の下底の高さ
- (13) $w 1 - i n g$: 第2の信号導体の下底の幅
- (14) $w 2 - i n g$: 第2の信号導体の上底の幅
- (15) $t - i n g$: 第2の信号導体の厚さ
- (16) $g a p$: 第1の信号導体と第2の信号導体の間の距離

このうち、GND導体の幅については、図3および図5に示すようなGND倍率 n を用いて指定することもできる。この場合、ユーザは、 $g w 1$ の代わりにGND倍率 n を入力し、 $g w 1$ は次式により求められる。

【0015】

$$g w 1 = h - e d \times n \times 2 + w 1 - e d \quad (1)$$

$g w 2$ についても、同様に、GND倍率を用いて指定することができる。

【0016】

次に、ユーザは、コモンモードまたはディファレンシャルモードを選択する。2つの信号導体の電圧の符号（電流の向き）が同じ場合はコモンモードを選択し、異なる場合はディファレンシャルモードを選択する。また、解析条件として、信号の周波数 f と導体の導電率 σ を入力する。例えば、周波数の単位としてはHz（ヘルツ）が用いられ、20℃のときの銅の導電率としては、 5.0×10^7 ($1/\Omega m$) が用いられる。

【0017】

さらに、ユーザは、導体の分割条件とセグメントの縦横の分割数を入力する。このとき、同じセグメント同士の積分を行う場合と、異なるセグメント間で積分

を行う場合とで、異なる分割数を指定することができる。例えば、前者の場合にセグメントをより細かく分割し、後者の場合にセグメントをより荒く分割すれば、積分計算を効率化するとともに、積分値の発散の問題を抑えることが可能となる。

【 0 0 1 8 】

次に、表皮抵抗係数算出部 1 5 は、真空中の透磁率を μ として、次式により表皮の深さ δ を計算する（ステップ S 2）。

$$\delta = 1 / (\pi f \mu \sigma)^{1/2} \quad (2)$$

次に、各導体について信号導体か GND 導体かを判定し（ステップ S 3）、信号導体であれば、以下のように分割する（ステップ S 4）。

【 0 0 1 9 】

所定数の分割レートをあらかじめ決めておき、導体の断面を縦横ともに“ $\delta \times$ 分割レート”の長さで分割する。これらの分割レートは、導体の表面に近い部分ほど間隔が小さく、表面から遠い部分ほど間隔が大きくなるように設定される。

【 0 0 2 0 】

例えば、分割レートとして、0.33、0.84、1.90、4.00、7.00 の 5 つの値が設定されている場合、信号導体の表面から $\delta \times 0.33$ 、 $\delta \times 0.84$ 、 $\delta \times 1.90$ 、 $\delta \times 4.00$ 、 $\delta \times 7.00$ の深さの位置に、表面と平行な分割面が生成される。したがって、表面に近い部分ほど分割面の間隔は小さくなり、表面から遠い部分ほど分割面の間隔は大きくなる。

【 0 0 2 1 】

このような分割方法によれば、表皮の深さ δ と分割レートの値に応じて、セグメントの縦横の長さ（分割面の間隔）が変化し、分割レートの数に応じて、セグメントの数が増える。

【 0 0 2 2 】

この分割により生成されたセグメントのうち、縦横比が所定の条件を満たしていないものについては、さらに細かく分割する。例えば、縦横比が 1 : 10 また

は 10 : 1 以内という条件が指定されている場合、この縦横比よりも細長いセグメントについては、条件が満たされるように再分割される。

【0023】

この方法で長方形の断面を持つ信号導体を分割すると、図 7 に示すような複数のセグメントに分割される。分割面は導体の表面と平行であるため、この例では、各セグメントの断面形状も長方形である。また、導体の表面に近い部分ほど細かく分割されており、セグメントの大きさはより小さくなる。逆に、導体の表面から遠い部分ほど荒く分割されており、セグメントの大きさはより大きくなる。

【0024】

このように、導体を表面に平行に、かつ、表面に近い部分ほど細かく分割することで、電流の流れる部分をより詳細に計算するとともに、電流の流れない部分の計算を簡略化することができる。

【0025】

また、GND 導体については、縦方向と横方向で異なる分割方法を用いる（ステップ S5）。縦方向については、信号導体に面した側の表面から、信号導体と同様にして、“ $\delta \times$ 分割レート” の長さで分割する。また、横方向については、信号導体に近い部分ほど細かく分割し、信号導体から遠い部分ほど荒く分割する。GND 導体では、一般に、電流は信号導体に面した部分に集中する傾向が見られるので、このように分割することで、電流の流れない部分の計算を簡略化することができる。

【0026】

ここでは、信号導体の端から GND 導体に垂線を下ろし、垂線と GND 導体の表面の交点からの距離に応じて、セグメントの横方向の長さを決定する。例えば、GND 導体の表面から信号導体までの距離（ $h - e d$ または $h - i n g$ ）を h として、GND 導体は以下のように分割される。

【0027】

信号導体の端から $2h$ までの範囲	$h / 4$ の幅で分割
$2h \sim 4h$ までの範囲	$h / 2$ の幅で分割

4 h ～ 8 h までの範囲	h の幅で分割
8 h 以遠の範囲	2 h の幅で分割

図 8 は、単導体のモデルにおける GND 導体の横方向の分割方法を示している。この場合、信号導体 6 1 と GND 導体 6 2 の距離を h として、上述した分割方法で GND 導体が分割される。したがって、領域 A 1 は $h/4$ の幅で分割され、領域 A 2 は $h/2$ の幅で分割され、領域 A 3 は h の幅で分割され、領域 A 4 は $2h$ の幅で分割される。

【 0 0 2 8 】

また、図 9 は、2 導体のモデルにおける GND 導体の横方向の分割方法を示している。この場合、信号導体 7 1、7 2 と GND 導体 7 3 の距離を h として、上述した分割方法で GND 導体が分割される。したがって、領域 A 1 は $h/4$ の幅で分割され、領域 A 2 は $h/2$ の幅で分割され、領域 A 3 は h の幅で分割される。図 9 では、2 つの信号導体 7 1、7 2 と GND 導体 7 3 の距離が同じであるが、距離が異なる場合には、短い方の距離が h として用いられる。

【 0 0 2 9 】

さらに、GND 導体を分割して得られるセグメントの縦横比についても、信号導体と GND 導体の距離 h に応じて、例えば、以下のような条件が設定される。

信号導体の端から h までの範囲	1 : 1 0 以内
$h \sim 2 h$ までの範囲	1 : 4 0 以内
$2 h \sim 4 h$ までの範囲	1 : 8 0 以内

そして、縦横比が設定された条件を満たしていないセグメントについては、条件が満たされるように、さらに細かく分割される。

【 0 0 3 0 】

図 1 0 は、2 導体のモデルにおける GND 導体の横方向の再分割方法を示している。この場合、信号導体 8 1 の方が信号導体 8 2 より GND 導体 8 3 に近いので、信号導体 8 1 と GND 導体 8 3 の距離を h として、上述したような縦横比が

設定されている。したがって、領域B1は縦横比が1:10以内になるように再分割され、領域B2は縦横比が1:40以内になるように再分割され、領域B3は縦横比が1:80以内になるように再分割される。領域B4については、条件が設定されていないため、再分割は行われぬ。

【0031】

こうして、信号導体とGND導体がセグメントに分割されると、次に、表皮抵抗係数算出部15は、各セグメントを指定された分割数で縦横に分割して、インダクタンスと抵抗を次式により計算する(ステップS6)。

【0032】

【数1】

$$L_{ij,km}^{(p)} = -\frac{\mu}{4\pi A_{ij} \cdot A_{km}} \iiint \ln[(y-y')^2 + (z-z')^2] dy' dz' dy dz \quad (3)$$

【0033】

$$R_{ij,km} = r_{00} + r_{ij} \delta_{ik} \delta_{jm} \quad (4)$$

$$r_{ij} = 1 / \sigma_i A_{ij}, \quad \delta_{ii} = 1, \quad \delta_{ij} = 0 \quad (i \neq j) \quad (5)$$

$$L_{ij,km} = L_{ij,km}^{(p)} - L_{ij,00}^{(p)} - L_{00,km}^{(p)} + L_{00,00}^{(p)} \quad (6)$$

ここで、iおよびkは導体の番号を表し(i, k=0, 1, ..., N)、jおよびmは各導体内のセグメントの番号を表す(j=0, 1, ..., N_i, m=0, 1, ..., N_k)。0番目の導体はGND導体に対応し、1~N番目の導体は信号導体に対応する。また、0番目のセグメントは、GND導体にのみ存在する基準セグメントを表し、N_iは、i番目の導体における最後のセグメントの番号を表す。以下では、i番目の導体におけるj番目のセグメントを(i, j)と記すことにする。

【0034】

(3)式において、yおよびzに関する積分は、セグメント(i, j)の断面

積に関する積分を表し、 y' および z' に関する積分は、セグメント (k, m) の断面積に関する積分を表す。

【0035】

また、 $L_{ij,km}^{(p)}$ は、セグメント (i, j) とセグメント (k, m) の間のインダクタンスを表し、 A_{ij} は、セグメント (i, j) の断面積を表す。また、 r_{ij} は、セグメント (i, j) の単位長さ当たりの直流抵抗を表し、 σ_i は、 i 番目の導体の導電率を表す。さらに、 $R_{ij,km}$ および $L_{ij,km}$ は、各セグメントの抵抗およびインダクタンスを表す。

【0036】

次に、 $J = (-1)^{1/2}$ と角周波数 ω を用いて、インピーダンス $Z_{ij,km}$ を、次式により計算する。

$$Z_{ij,km} = R_{ij,km} + J \omega L_{ij,km} \quad (7)$$

以下では、(7) 式のインピーダンスを要素とするインピーダンス行列を Z と記し、 $f \neq 0$ および $f = 0$ (直流) の場合のインピーダンス行列を、それぞれ $Z_{(f)}$ および $Z_{(DC)}$ と記すことにする。

【0037】

次に、アドミタンス行列 $Y_{(f)}$ および $Y_{(DC)}$ を、次式により計算する (ステップ S7)。

$$Y_{(f)} = Z_{(f)}^{-1} \quad (8)$$

$$Y_{(DC)} = Z_{(DC)}^{-1} \quad (9)$$

次に、 $V = 1$ (V) として、各セグメントの電流値を次式により計算する。

【0038】

$$I_{(f)} = Y_{(f)} V \quad (10)$$

次に、アドミタンス行列 $Y_{(f)}$ および $Y_{(DC)}$ を、次式によりリダクションする (ステップ S8)。

【0039】

【数2】

$$y_{ik} = \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{N_k} Y_{ij,km} \quad (i, k = 1, \dots, N) \quad (11)$$

【0040】

$$Y_{(f)} \Rightarrow y_{(f)} \quad (12)$$

$$Y_{(DC)} \Rightarrow y_{(DC)} \quad (13)$$

このリダクションにより、各導体内のすべてのセグメントに関して $Y_{ij,km}$ が加算され、GND導体に関する要素は落とされる。したがって、 $y_{(f)}$ および $y_{(DC)}$ は、単導体の場合は 1×1 の行列になり、2導体の場合は 2×2 の行列になる。

【0041】

次に、次式により、アドミタンス行列をインピーダンス行列に戻す (ステップ S9)。

$$z_{(f)} = y_{(f)}^{-1} \quad (14)$$

$$z_{(DC)} = y_{(DC)}^{-1} \quad (15)$$

ここで、 $f \neq 0$ の場合の信号導体の抵抗およびインダクタンスを、それぞれ $R_{(f)}$ および $L_{(f)}$ と記し、 $f = 0$ の場合の抵抗およびインダクタンスを、それぞれ $R_{(DC)}$ および $L_{(DC)}$ と記すことにすると、次式が成り立つ。

【0042】

$$z_{(f)} = R_{(f)} + j\omega L_{(f)} \quad (16)$$

$$Z_{(DC)} = R_{(DC)} + j\omega L_{(DC)} \quad (17)$$

そこで、(16)、(17)式により、 $R_{(f)}$ 、 $R_{(DC)}$ 、 $L_{(f)}$ 、および $L_{(DC)}$ を求め、表皮抵抗係数 R_s を次式により計算する(ステップS10)。

【0043】

$$R_s = (R_{(f)} - R_{(DC)}) / f^{1/2} \quad (18)$$

R_s の計算が終了すると、シミュレーション装置は、得られた計算結果を表示部13の画面に表示するとともに、ログファイルに出力する(ステップS11)。このとき、計算結果を既存のログファイルの最後に追加するように、設定しておくことが可能である。また、計算結果の出力設定としては、例えば、以下の項目の中から必要なものを選択することができる。

- (1) セグメント情報
- (2) 各セグメントの抵抗とインダクタンス
- (3) インピーダンス行列
- (4) アドミタンス行列
- (5) 各セグメントの電流値
- (6) 表皮抵抗係数

さらに、例えば、1GHzと2GHzのように、複数の周波数について表皮抵抗係数を求める場合は、あらかじめ入力ファイルにそれらの周波数を設定しておくことで、計算を連続して実行することができる。

【0044】

ところで、図1のシミュレーション装置は、例えば、図11に示すような情報処理装置(コンピュータ)を用いて構成される。図11の情報処理装置は、CPU(中央処理装置)91、メモリ92、入力装置93、出力装置94、外部記憶装置95、媒体駆動装置96、およびネットワーク接続装置97を備え、それらはバス98により互いに接続されている。

【0045】

メモリ 92 は、例えば、ROM (readonly memory)、RAM (random access memory) 等を含み、処理に用いられるプログラムとデータを格納する。CPU 91 は、メモリ 92 を利用してプログラムを実行することにより、必要な処理を行う。図 1 の記憶部 12 は、メモリ 92 に対応し、図 1 の制御部 14、表皮抵抗係数算出部 15、および解析部 16 は、メモリ 92 に格納されたプログラムに対応する。

【0046】

入力装置 93 は、例えば、キーボード、ポインティングデバイス、タッチパネル等であり、ユーザからの指示や情報の入力に用いられる。出力装置 94 は、例えば、ディスプレイ、プリンタ、スピーカ等であり、ユーザへの問い合わせや処理結果の出力に用いられる。図 1 の入力部 11 および表示部 13 は、それぞれ、入力装置 93 および出力装置 94 に対応する。

【0047】

外部記憶装置 95 は、例えば、磁気ディスク装置、光ディスク装置、光磁気ディスク装置、テープ装置等である。情報処理装置は、この外部記憶装置 95 に、上述のプログラムとデータを保存しておき、必要に応じて、それらをメモリ 92 にロードして使用する。

【0048】

媒体駆動装置 96 は、可搬記録媒体 99 を駆動し、その記録内容にアクセスする。可搬記録媒体 99 としては、メモリカード、フロッピーディスク（登録商標）、CD-ROM (compact disk read only memory)、光ディスク、光磁気ディスク等、任意のコンピュータ読み取り可能な記録媒体が用いられる。ユーザは、この可搬記録媒体 99 に上述のプログラムとデータを格納しておき、必要に応じて、それらをメモリ 92 にロードして使用する。

【0049】

ネットワーク接続装置 97 は、LAN (local area network) やインターネット等の任意の通信ネットワークに接続され、通信に伴うデータ変換を行う。情報処理装置は、上述のプログラムとデータをネットワーク接続装置 97 を介して他の装置から受け取り、必要に応じて、それらをメモリ 92 にロードして使用する。

【 0 0 5 0 】

図 1 2 は、図 1 1 の情報処理装置にプログラムとデータを供給することのできるコンピュータ読み取り可能な記録媒体を示している。可搬記録媒体 9 9 やサーバ 1 0 0 のデータベース 1 0 1 に保存されたプログラムとデータは、メモリ 9 2 にロードされる。このとき、サーバ 1 0 0 は、プログラムとデータを搬送する搬送信号を生成し、ネットワーク上の任意の伝送媒体を介して情報処理装置に送信する。そして、CPU 9 1 は、そのデータを用いてそのプログラムを実行し、必要な処理を行う。

(付記 1) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムであって、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算し、
計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

(付記 2) 前記コンピュータは、前記複数の面の間隔が表皮の深さに応じて変化するようなモデルを生成することを特徴とする付記 1 記載のプログラム。

(付記 3) 前記生成されたモデルを用いて、前記導体の表皮抵抗係数を計算し、得られた表皮抵抗係数を出力する処理を、さらに前記コンピュータに実行させることを特徴とする付記 1 記載のプログラム。

(付記 4) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムであって、

前記周波数を用いて表皮の深さを計算し、

導体の表面からの深さを前記表皮の深さと分割レートの積で表したとき、該表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるような、複数の分割レートを用いて設定された、信号導体の表面と平行な複数の面により、該信号導体を縦横に分割し、該複数の分割レートを用いて設定された、グラウ

ンド導体の表面と平行な複数の面により、該グラウンド導体を縦に分割し、さらに、該信号導体と該グラウンド導体の距離に基づいて設定された複数の面により、該グラウンド導体を横に分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記信号導体の抵抗を計算し、

計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするプログラム。

(付記5) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータのためのプログラムを記録した記録媒体であって、該プログラムは、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算し、

計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

(付記6) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求めるコンピュータにプログラムを搬送する搬送信号であって、該プログラムは、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算し、

計算結果を出力する

処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とする搬送信号。

(付記7) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求める計算方法であって、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大き

くなるように、該表面と平行な複数の面を設定し、

前記複数の面により前記導体を分割したモデルを生成し、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算することを特徴とする計算方法。

(付記 8) 与えられた信号の周波数に応じて、表皮効果を考慮した導体の抵抗を求める処理装置であって、

前記導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、該表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、該導体の表面と平行な複数の面により、該導体を分割したモデルを生成する手段と、

生成されたモデルを用いて、前記周波数に対応する前記導体の抵抗を計算する手段と、

計算結果を出力する手段と

を備えることを特徴とする処理装置。

【 0 0 5 1 】

【発明の効果】

本発明によれば、表皮効果を考慮したシミュレーションにおいて、導体内の電流の流れる部分の計算精度を保ちつつ、電流の流れない部分の計算を簡略化することができる。したがって、導体の抵抗および表皮抵抗係数を精度良く高速に求めることが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明のシミュレーション装置の原理図である。

【図 2】

表皮抵抗係数計算処理のフローチャートである。

【図 3】

第 1 の導体モデルを示す図である。

【図 4】

第 2 の導体モデルを示す図である。

【図 5】

第 3 の導体モデルを示す図である。

【図 6】

第 4 の導体モデルを示す図である。

【図 7】

信号導体の分割方法を示す図である。

【図 8】

GND 導体の第 1 の分割方法を示す図である。

【図 9】

GND 導体の第 2 の分割方法を示す図である。

【図 1 0】

GND 導体の第 3 の分割方法を示す図である。

【図 1 1】

情報処理装置の構成図である。

【図 1 2】

記録媒体を示す図である。

【符号の説明】

1 1 入力部

1 2 記憶部

1 3 表示部

1 4 制御部

1 5 表皮抵抗係数算出部

1 6 解析部

1 7、9 8 バス

2 1、3 1、3 2、4 2、5 2、5 3、6 1、7 1、7 2、8 1、8 2 信号

導体

2 2、3 3、4 1、4 3、5 1、5 4、6 2、7 3、8 3 GND 導体

9 1 CPU

9 2 メモリ

9 3 入力装置

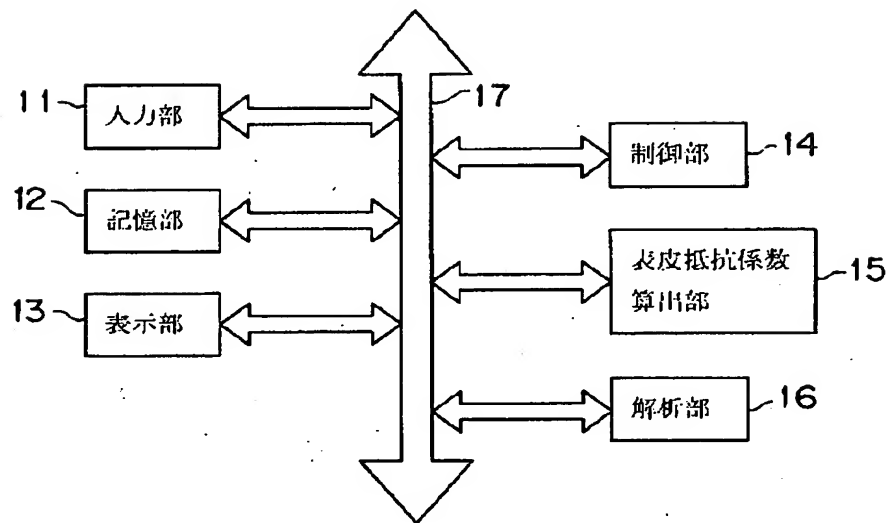
- 9 4 出力装置
- 9 5 外部記憶装置
- 9 6 媒体駆動装置
- 9 7 ネットワーク接続装置
- 9 9 可搬記録媒体
- 1 0 0 サーバ
- 1 0 1 データベース

【書類名】

図面

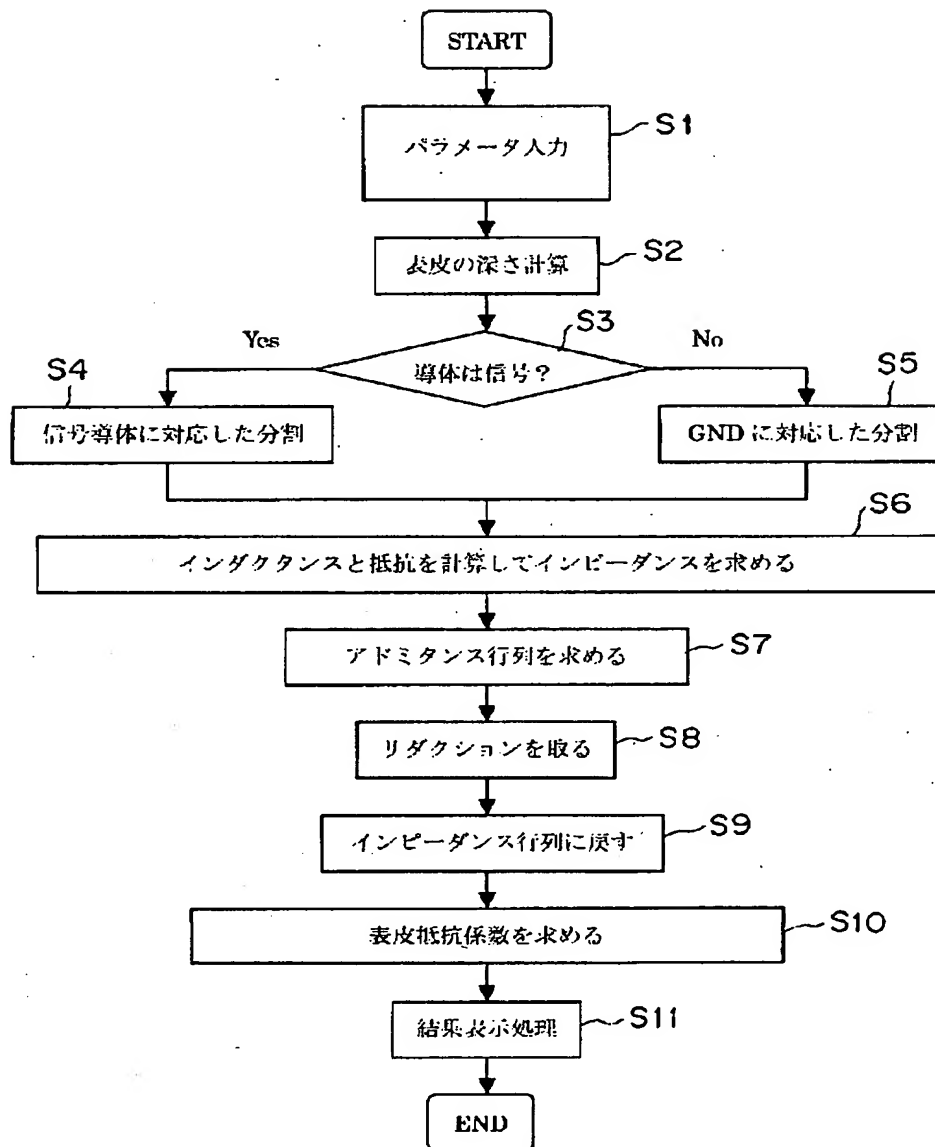
【図1】

シミュレーション装置の構成図



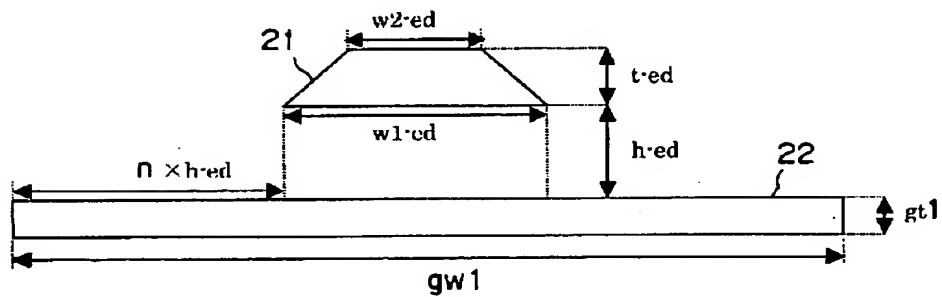
【図 2】

表皮抵抗係数計算処理のフローチャート



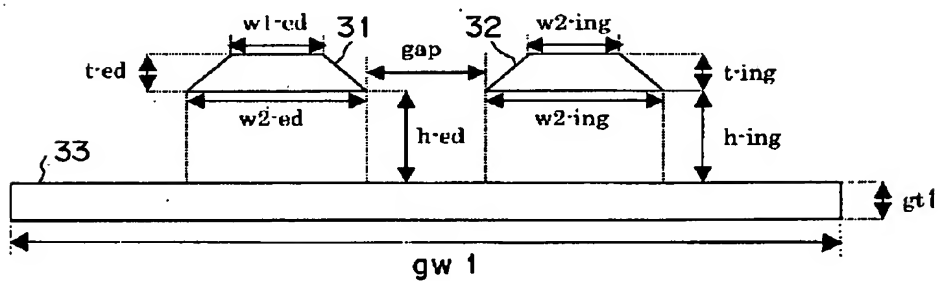
【図 3】

第1の導体モデルを示す図



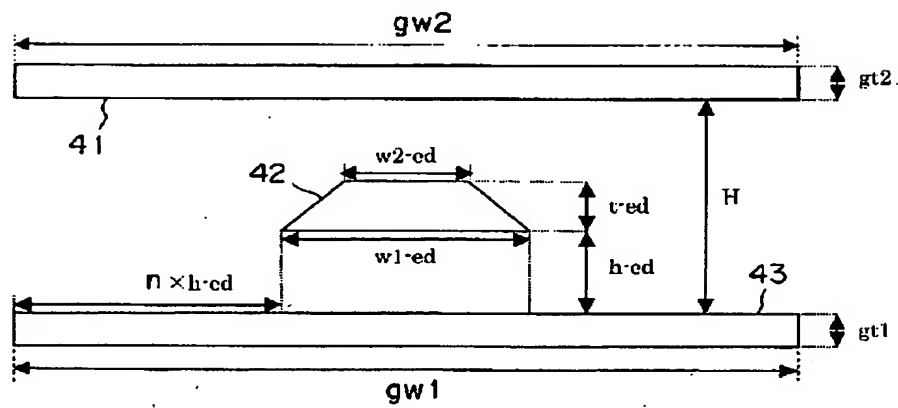
【図 4】

第2の導体モデルを示す図



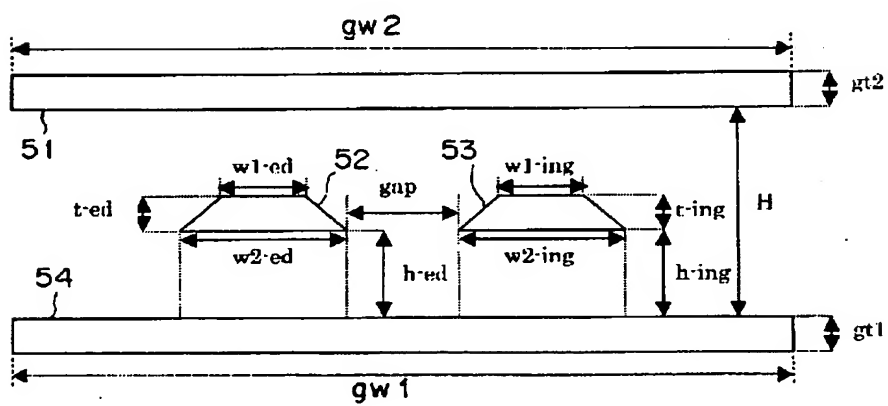
【図 5】

第3の導体モデルを示す図



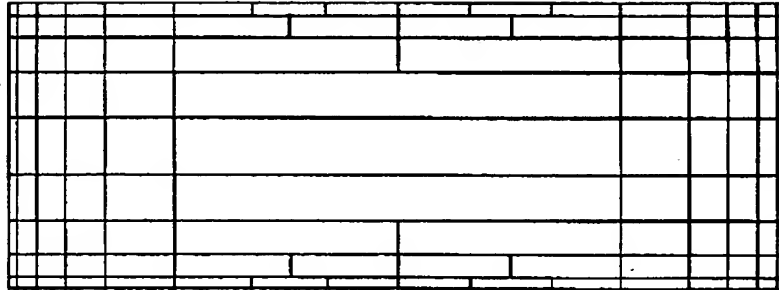
【図 6】

第4の導体モデルを示す図



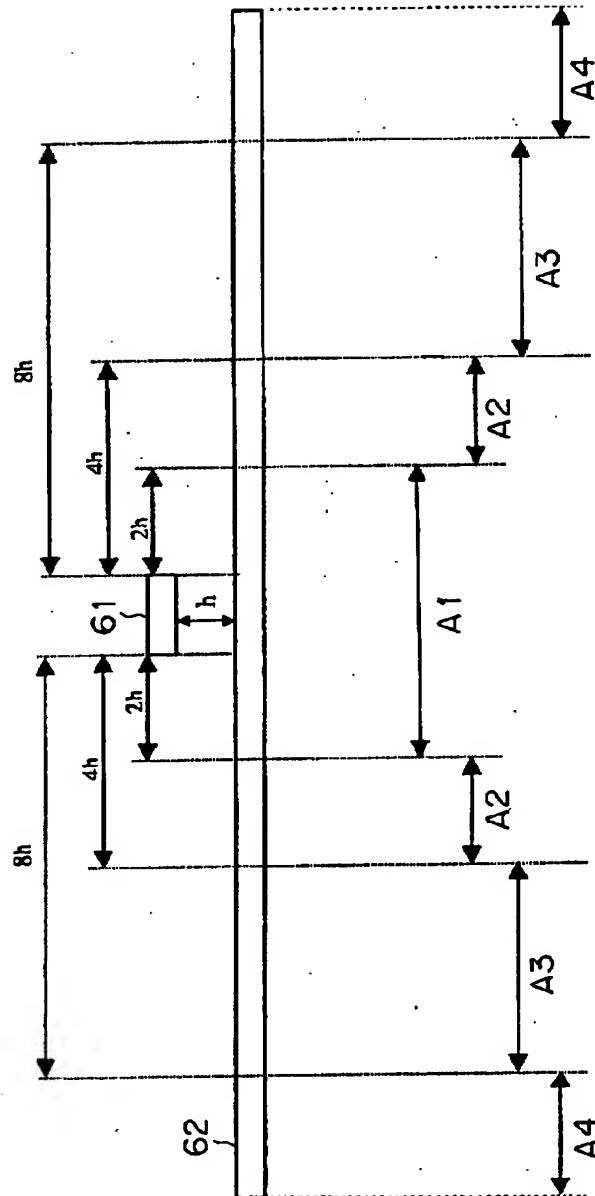
【図 7】

信号導体の分割方法を示す図



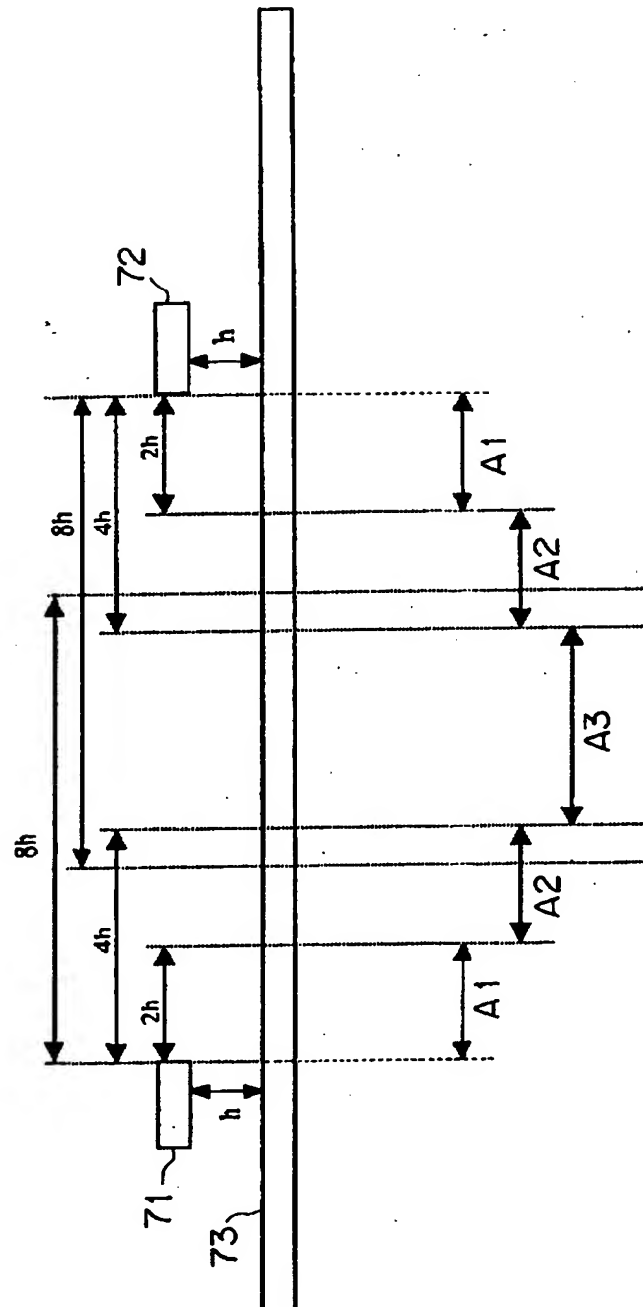
【図 8】

GND導体の第1の分割方法を示す図



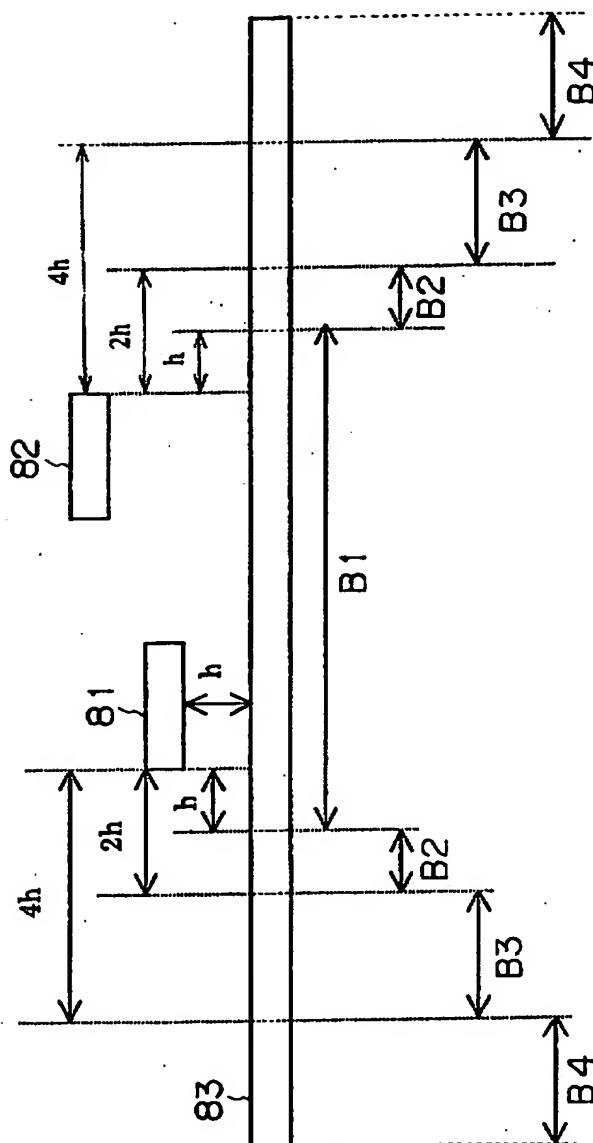
【図9】

GND導体の第2の分割方法を示す図



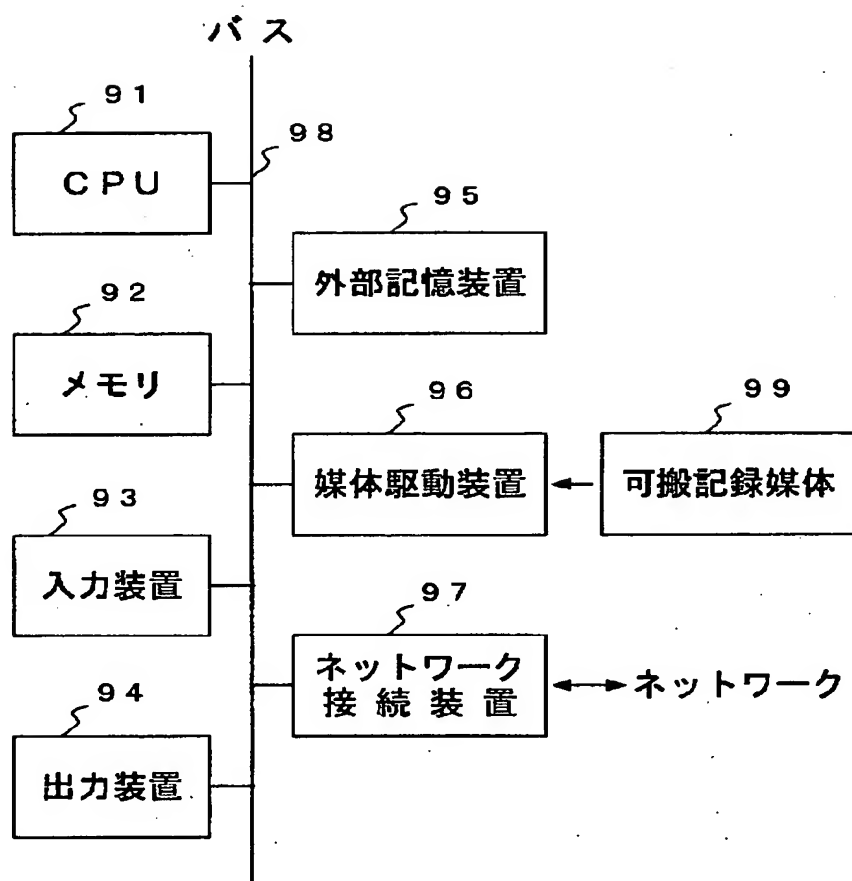
【図10】

GND導体の第3の分割方法を示す図



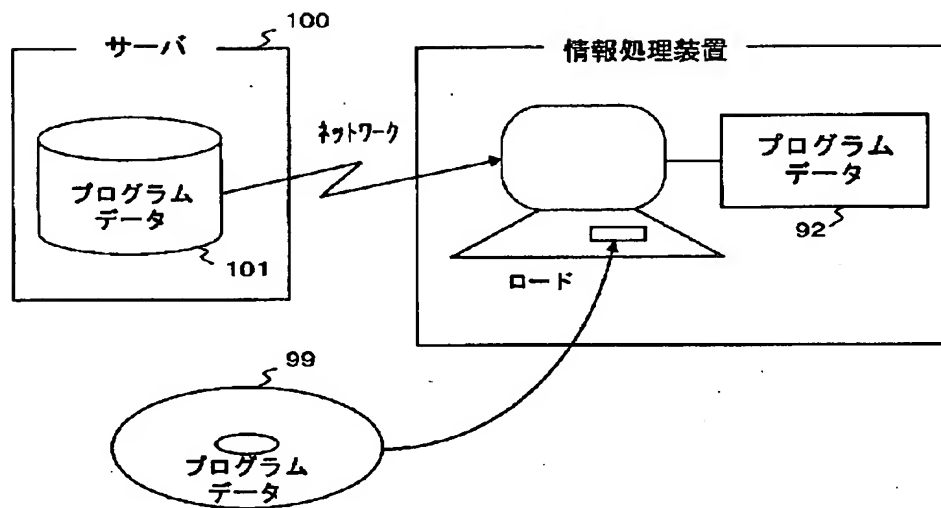
【図 11】

情 報 処 理 装 置 の 構 成 図



【図 12】

記 録 媒 体 を 示 す 図



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 表皮効果を考慮したシミュレーションにおいて、導体抵抗の計算に必要な精度を保ちつつ、その計算を高速化する。

【解決手段】 信号導体の表面に近いほど間隔が小さくなり、表面から遠いほど間隔が大きくなるように設定された、表面と平行な複数の面により、信号導体を縦横に分割し、グラウンド導体も同様の方法で縦に分割して、積分計算により、与えられた周波数に対応する信号導体の抵抗を求める。

【選択図】 図 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005223]

1. 変更年月日	1996年 3月26日
[変更理由]	住所変更
住 所	神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
氏 名	富士通株式会社